

新兴的高能激光器——氧碘化学激光器

毕爱莲 张荣耀 陈方庄 琦

(中国科学院大连化学物理研究所, 大连 116023)

氧碘化学激光器是近年来国际上竞相研究的一种高能激光器。概述了氧碘化学激光器的基本原理, 阐明了提高 $O_2(^1\Delta)$ 化学发生器的效率是提高氧碘化学激光器性能的关键; 展望了氧碘化学激光器可能的应用前景, 指出工业应用或许是氧碘化学激光器近、中期应用的重要方面; 简单介绍了中国科学院大连化学物理研究所有关氧碘化学激光方面的研究工作。

Abstract

The chemical oxygen-iodine laser (COIL) has recently attracted wide attention because of its powerful and efficient performance. We first outline the principle of this new laser and point out that the $O_2(^1\Delta)$ generator is the key to improved efficiency. Possible applications are then reviewed and industrial applications are predicted to be significant and attractive. Finally, investigations on COIL in the Dalian Institute of Chemical Physics are presented.

化学激光器指的是一类激光系统, 其中激活介质的粒子数反转是在化学反应过程中实现的。氧碘化学激光器是继 HF/DF 化学激光器之后的一种新兴的高能化学激光器。它具有很多优点, 例如激光波长更短 ($1.315\mu\text{m}$)、效率更高、光束质量较好、储能高, 以及装置安全、简便, 所以有可观的应用前景。由于其激光波长正好位于已能批量生产的光导纤维的低传输损耗波段, 国外正在研究将这种激光器与光导纤维结合, 用于金属切割、焊接和光通信上。

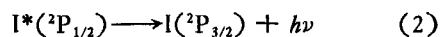
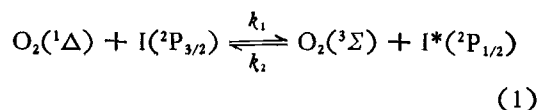
氧碘化学激光器可以连续波方式或脉冲方式运转。在脉冲方式运转下, 激光器与靶的耦合效果可改进。使用非线性晶体或共振加强的原子蒸气, 通过二倍频或者三倍频可将 $1.315\mu\text{m}$ 激光输出转换成可见光波段的激光。

自从 1978 年美国空军武器实验室首次研制出国际上第一台连续波氧碘化学激光器以来^[1], 美国、苏联、中国、法国、日本等国竞相开展氧碘化学激光器的研究。现在美国已研制成

规模相当大的 (35kW) 连续波氧碘化学激光器, 中国科学院大连化学物理研究所也进行了大量的研究。

一、氧碘化学激光器的基本原理

如图 1 所示, 氧碘化学激光器主要是依靠化学反应产生的激发态的 $O_2(^1\Delta)$, 通过共振传能过程将 $O_2(^1\Delta)$ 的能量传给基态碘原子 $I(^2P_{3/2})$, 产生激发态碘原子 $I^*(^2P_{1/2})$, 然后使激发态的碘原子 $I^*(^2P_{1/2})$ 达到粒子数反转, 在激光腔内激射输出 $1.315\mu\text{m}$ 的激光^[1,2]。



(波长为 $1.315\mu\text{m}$ 的激光)

显然, 要产生碘激光, 首先要提供化学能源, 即 $O_2(^1\Delta)$ 的发生; 其次要有基态碘原子以便传能

产生激发态碘原子,即碘原子的产生;最后激发态碘原子必须达到粒子数反转,以形成一定的激光增益。下面我们按上述三个部分加以讨论。

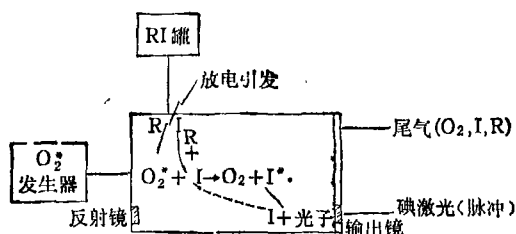
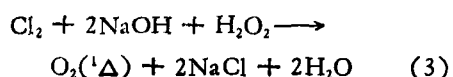


图1 氧碘化学激光器简化原理示意图

1. 化学发生激发态的氧

由于氧碘化学激光器的激光输出依赖于从激发态的氧到原子碘的传能过程,所以有效地产生激发态的氧是氧碘化学激光器的关键之一。目前产生激发态的氧的方法很多,除了化学发生外,还有电子放电、微波放电、直接核泵浦、 O_3 光解等。但是,可作为氧碘化学激光器能源的激发态的氧,只能用化学发生方法产生,因为它产生的激发态的氧浓度高,可达到氧碘化学激光器出光的阈值。正因为氧碘激光器的能源是化学反应发生的,所以从广义来说可称其为化学激光器。

化学发生的方法是利用 Cl_2 通过碱性的过氧化氢水溶液而产生激发态的氧,反应过程如下:



反应可产生 100% 的 $O_2(^1\Delta)$ 。反应式(3)实际上不是在气相也不是在液相进行,而是在 Cl_2 和 H_2O_2-NaOH 溶液构成的气液界面上进行。另外, $O_2(^1\Delta)$ 在液相中寿命很短,约 $2\mu s$,而在气相中寿命为 45min,所以发生器设计中通常要保证 $O_2(^1\Delta)$ 在气液界面上生成后,能迅速从液膜内扩散出来,逃逸至气相。反应副产物 H_2O 和 H_2O_2 残液对 $O_2(^1\Delta)$ 和激发态 $I^*(^2P_{1/2})$ 都有强烈猝灭作用,所以发生器出口一般装有冷阱除去杂质 H_2O 和 H_2O_2 。冷阱一般采用干冰作冷冻剂。

目前国际上通常使用的化学发生器结构可分为四种:鼓泡式、雾化式、湿壁列管式和转盘式,其中以鼓泡式最成熟,转盘式易于放大。

(1) 鼓泡式发生器

鼓泡式发生器装置结构较简单,广泛用于小型氧碘化学激光实验中。图2为其示意图。氯气通过多孔鼓泡器(钻有很多小孔的玻璃管或多孔性烧结玻璃板)在 H_2O_2-NaOH 溶液中不断鼓泡。大量气泡提供了较大的反应接触表面。

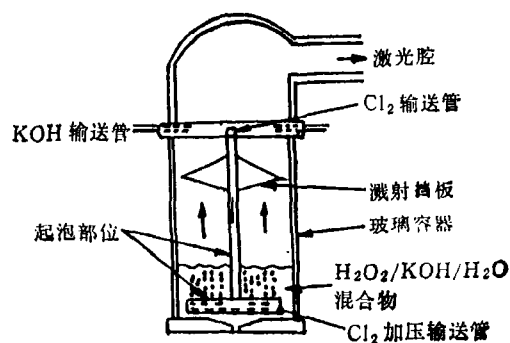


图2 鼓泡式 $O_2(^1\Delta)$ 发生器装置示意图

由于反应式(3)是在气液面上靠扩散进行的,下式是 $O_2(^1\Delta)$ 分子在溶液内经过距离 d 后尚保留的百分率 η 的关系式:

$$\eta = \sqrt{\frac{D}{d^2\alpha}} \left[1 - \exp\left(-\sqrt{\frac{d^2\alpha}{D}}\right) \right], \quad (4)$$

D 为 O_2 在溶液中的扩散系数,为 $5 \times 10^{-6} \text{cm}^2/\text{s}$; α 为 $O_2(^1\Delta)$ 猝灭速率,在 H_2O_2-NaOH 溶液内为 $0.5 \times 10^6 \text{s}^{-1}$ 。若要求 $O_2(^1\Delta)$ 分子保留 85%,则由(4)式可计算得它在溶液内的扩散距离只允许 10^{-6}cm 。可见反应只是在厚度为 10^{-6}cm 的液膜内进行。若氯分压过高,则扩散入液膜过深, $O_2(^1\Delta)$ 生成后将来不及离开液相而被猝灭为基态 O_2 。由表1也可看到发生器内以气液界面猝灭最为主要。由于 $O_2(^1\Delta)$ 在气相中猝灭很快,发生器只能在低压下操作,一般鼓泡式发生器的操作压力低于 $2 \sim 3 \text{Torr}$ 。

(2) 转盘式发生器

如图3所示,转盘式发生器内装有很多圆形转盘,当转盘在盛有 H_2O_2-NaOH 溶液的池

表 1 O₂(¹Δ) 在各种介质中的寿命

液相	气相		器壁碰撞
	P(Torr)	τ(s)	
2×10 ⁻⁴	1.7	1	10s
	10	0.17	
	17	0.1	

内转动时, 转盘壁上附着 H₂O₂-NaOH 液膜, 而 Cl₂ 即与此液膜发生反应产生 O₂(¹Δ)。反应过的液膜又随转盘转入池内进行更新, 并将反应副产物排除。发生器温度控制是通过反应液在热交换器中的循环维持的。含有液滴微粒的 O₂(¹Δ) 气流在发生器出口处进入一冷阱, 以降低水汽含量。此种发生器能提供大而稳定的反应接触表面, 可用于大流量 O₂(¹Δ) 发生, 同时 O₂(¹Δ) 分压也较高, 而激光输出是与 O₂(¹Δ) 分压成正比的。

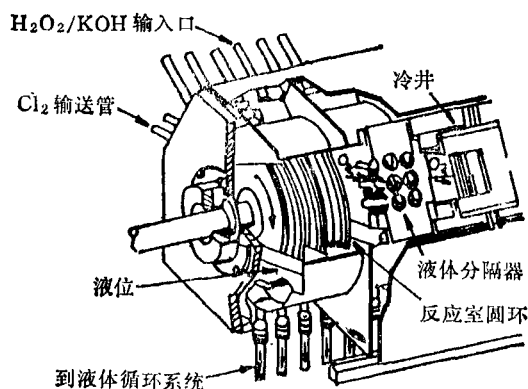
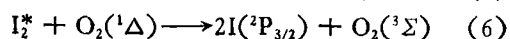
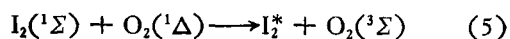


图 3 转盘式发生器装置示意图

据报道, 国外已将转盘式 O₂(¹Δ) 发生器用于大型氧碘化学激光器上, O₂(¹Δ) 发生率每秒 1 克分子, 总压约 10~20Torr, O₂(¹Δ) 浓度可达 90%。连续波激光输出功率可达 35kW。

2. 碘原子的产生(即 I₂ 的离解)

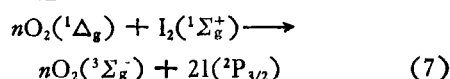
当 I₂ 从喷嘴注入有 O₂(¹Δ) 气流的激光腔内时, 迅速混合, 引起如下反应:



其中 I₂^{*} 为激发态的碘分子。上述反应结果使

物理

基态分子 I₂ 迅速解离为基态碘原子 [I(²P_{3/2})]。解离反应可总括为



n 为所需 O₂(¹Δ) 分子数。实验表明: 通过碰撞把一个 I₂ 分子离解为基态碘原子需要 2~5 个 O₂(¹Δ) 分子。因为 I₂ 对 O₂(¹Δ) 的比值很小, 因此尽管不断用来泵浦 I 原子, 受激态氧分子也不会有显著损耗。

3. 激光器增益

由反应式(1)可看出, 电子受激亚稳态的 O₂(¹Δ) 的能量通过与基态碘原子 I(²P_{3/2}) 共振能量转移反应方式产生激发态碘原子 I*(²P_{1/2})。有关能级示于图 4。反应式(1)放热是 279cm⁻¹。碘有着非均匀增宽谱线, 只在最高增益的跃迁中产生激光。这种增益关系从理论上可推导得到。若考虑上下碘原子激光能级的简并度 g_u 和 g_l 分别为 7 和 9, 并假定超精细结构的能级粒子数是按照能级统计权重来分布的, 则上能级粒子数 N_u = $\frac{1}{12} g_u [I^*]$ 和下能级粒子数 N_l = $\frac{1}{24} g_l [I]$ 。谱线宽度 Δν 按多普勒宽度来计算, 则氧碘化学激光的小信号增益可描述为

$$g_0 = \frac{A\lambda^3}{8\pi} \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} \cdot \frac{7}{12} \left([I^*] - \frac{1}{2} [I] \right) - \sigma \left([I^*] - \frac{1}{2} [I] \right), \quad (8)$$

A 为自发辐射爱因斯坦系数, λ 为激光波长, [I*] 和 [I] 分别为激发态碘原子 I*(²P_{1/2}) 和基态碘原子 I(²P_{3/2}) 浓度。室温下受激发射截面 σ 为 5~7.4×10⁻¹⁸cm²。由于氧碘共振传能的正逆过程(1)进行很快, k₁ 和 k₂ 为其速率常数, 存在平衡关系时, 小信号增益可表达为

$$g_0 = \sigma [I_0] \frac{\left(2K_{e,q} \frac{F}{1 - F + \sum \frac{k_M}{M_0}} - 1 \right)}{\left(K_{e,q} \frac{F}{1 - F + \sum \frac{k_M}{M_0}} + 1 \right)}, \quad (9)$$

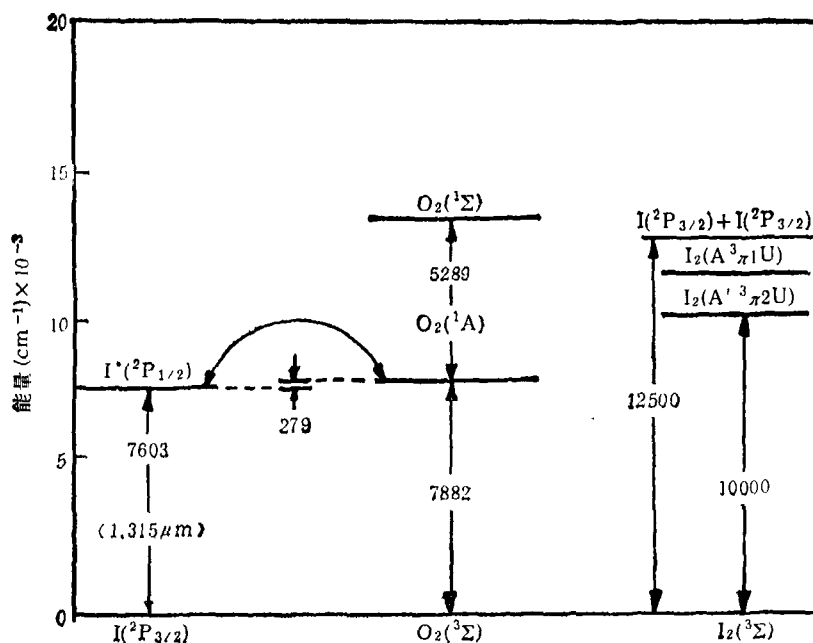


图4 能级示意图

其中 $F = \frac{[O_2(^1\Delta)]}{[O_2(^1\Delta)] + [O_2(^3\Sigma)]}$, $K_{o,q} = \frac{k_1}{k_2}$,

$M_o = \frac{[M]}{[O_2(^1\Delta)] + [O_2(^3\Sigma)]}$; M_o 表示对激

发态 $I^*(^2P_{1/2})$ 起猝灭作用的物质 M 对总氧的比例, $[M]$ 为猝灭物质的浓度, k_M 为猝灭速率常数。 $[O_2(^1\Delta)]$ 和 $[O_2(^3\Sigma)]$ 分别为 $O_2(^1\Delta)$ 分子和氧分子的浓度。对于连续波氧碘化学激光器, $[I_o]$ 表示初始加入的碘分子浓度。由 (9) 式, 可看到氧碘化学激光的小信号增益除了与加入的碘分子浓度有关外, 还与 $O_2(^1\Delta)$ 占总氧的百分浓度 F 密切相关, 因而氧碘化学激光器的增益可通过提高 $O_2(^1\Delta)$ 发生器的性能来提高。大于 1% 的增益已经达到, 而且增益还同激活区中猝灭物质浓度 M_o 和 k_M 有关。由 (9) 式还可计算得 $O_2(^1\Delta)$ 百分浓度不能低于 15%, 否则激光器中激发态碘原子的粒子数将不能反转, 因而不能出激光。此数值称为 $O_2(^1\Delta)$ 阈值百分浓度。

二、氧碘化学激光器的应用前景

自从激光器问世以来, 激光器的各种应用

亦随之而来, 如材料加工、光学通信、测量及医学领域的应用, 其中应用最广的是 CO_2 激光器和 YAG 激光器。 CO_2 激光器是一种中红外波长的激光器, 虽然由于高效率和高功率而被广泛用于金属切割和焊接等材料加工行业, 但因其波长较长对金属加工不很理想, 也缺乏合适的光导纤维束; YAG 激光器可通过硅光导纤维传输, 且传输损失很少, 其应用范围也很广, 但是 YAG 激光器功率不够高, 且光束质量亦不够好。所以, 人们在竭力寻求一种激光器, 能同时满足输出功率高、通过光纤传输损耗低且光束质量好, 以便更好地投入工业使用。氧碘化学激光器激光波长 $1.315 \mu m$, 输出功率可以超过 CO_2 激光器, 由图 5 可看出¹⁾, 其激光波长刚好落在硅光导纤维传输损失最低的波段。氧碘化学激光器是气体激光器, 可以达到比较好的光束质量, 又可和 YAG 激光器媲美, 因而是最有希望成为继 CO_2 和 YAG 激光器之后又一种新型工业应用激光器。目前, 日本已研制成一个 1kW 级高能氧碘化学激光器, 准备投入工业应用, 利用其光纤传输性能可全方位地、立

1) S. Yoshida et al., Proceedings of the International Conference on Lasers' 87, Dec. 7-11, (1987).

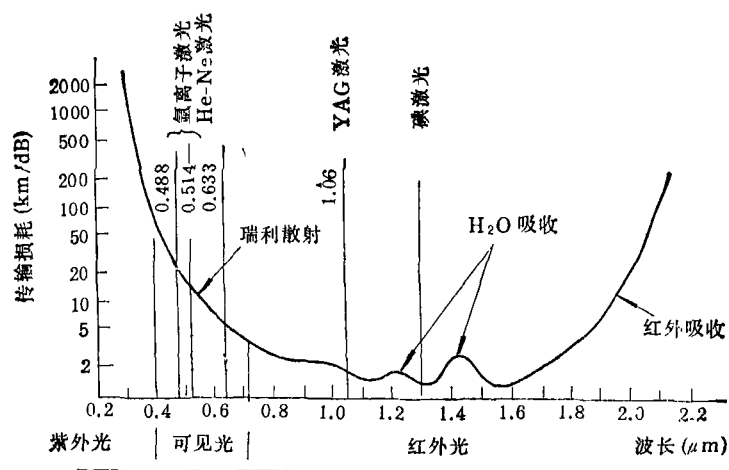


图5 硅纤维传输性能

体地进行金属切割、焊接、打孔、材料热处理等操作。

氧碘化学激光器除了可用于工业加工之外，也可用于医学领域如治疗组织病变等。另外，由于高功率激光器具有将破坏性能量以光束传输至远距离靶目标的能力，把它们作为定向能武器是有潜在的吸引力的。大功率的氧碘化学激光器亦可用于军事目的。

尽管氧碘化学激光器有种种优点，付诸实用却尚有一定困难，关键是要保证激光器能稳定高效地运转和长期连续地操作。目前设计者正在朝这一方向努力，我们预期在不远的将来，氧碘化学激光器可以投入工业、医疗等领域使用，为民造福。

三、中国科学院大连化学物理研究所研究氧碘激光器情况简介

大连化学物理研究所（以下简称大连化物所）80年代初开始研究氧碘化学激光器，迄今已研制出小型连续波氧碘化学激光器和光解/放电引发的脉冲氧碘化学激光器，同时在激光器件，理论与模型计算，性能测试诊断等方面都取得了一定进展，培养了一批科研人才，为推动我国化学激光的研究做出了贡献。

1. 激光器件研究

80年代初，大连化物所研制出国内第一台物理

十余瓦级小型连续波氧碘化学激光器，其化学效率达到国外同类规模的先进水平。其后，脉冲氧碘化学激光因其潜在独特的性能得到了广泛的重视。连续波氧碘化学激光器虽然已较成熟，但脉冲氧碘化学激光的研究较为复杂，至今成效不多。因此早在1983年，大连化物所就着手脉冲氧碘化学激光的研究。1984年，他们率先在国际上获得了光解引发脉冲氧碘化学激光，且注意到用碘化物代替通常使用的碘分子以实现脉冲运转，也解决了激发态碘原子 $I^*(^2P_{1/2})$ 被碘分子强烈猝灭而影响激光输出的问题，从而为氧碘化学激光实现高能脉冲运转开辟了新的途径。自“七五”阶段起，他们又对激光器进行了改进，率先提出用低能电子引发氧碘激光反应的新观点代替原有的光解引发方法，并且在试验技术上成功地解决了用电子碰撞不能选择地解离碘化物的难题，他们证实低能电子引发确实比光解引发更为有效，制成了国际上第一台用放电引发的脉冲氧碘化学激光器，并且采用同步双节放电引发技术，提高了低能增益激活介质的能量提取效率。激光器各种性能和效率比光解引发有了很大突破。激光输出能量由过去每脉冲160mJ提高到450mJ，化学效率由10—12%提高到34%，电引发效率更由0.016%提高到18%（约提高了1100倍），本征电效率为114%。他们还克服了光引发电

效率低和不易做到重复脉冲运转的缺点,使引发装置体积大为缩小。国外至今只有光解引发的脉冲氧碘化学激光,化学效率只有15%,电效率为0.67%。他们的试验结果引起国外同行的瞩目。此项成果获中国科学院1989年科技进步一等奖。

2. 理论与模型计算

任何器件的设计都离不开理论的指导,十年来,大连化物所培养了一批理论与模型计算人员,为理论指导实验准备了条件。以光引发脉冲氧碘化学激光器研究为例,在器件设计之前,首先请理论家进行数学模型计算。模型包括35个化学动力学过程、采用闪光灯光解碘化物RI得到碘原子、再与 $O_2(^1\Delta)$ 传能产生脉冲氧碘化学激光输出。通过这样的模型以及采用Runge-Kutta-Gill积分法在计算机上求解,计算表明这种光解引发的脉冲氧碘化学激光的 $O_2(^1\Delta)$ 化学能利用效率达60%,在一定工作条件下可获得 $10\sim 150\mu s$ 的激光脉宽。

1984年他们用 $O_2(^1\Delta)-CF_3I-Ar$ 体系进行实验验证,首次获得了光解引发的脉冲氧碘化学激光。激光脉宽随腔压可在 $10\sim 130\mu s$ 调节。这与理论计算符合。

3. 诊断测试技术

他们建立了用于测定 $O_2(^1\Delta)$ 绝对浓度的红外辐射量热法、测定低增益系数的小信号增益测试技术、可测 $1.315\mu m$ 激光光束质量测定仪以及低压下微量水分和氯的测定方法。以小信号增益的测试诊断为例,由于氧碘化学激光器为一低增益激光器,因此测定低增益脉冲氧碘化学激光器的增益系数是一重要而又困难的工作。他们首先研制成一台近衍射极限的光解脉冲碘激光器,作为探测激光束(激光输出能量 $40\sim 50mJ$),供测增益使用,克服了同步识别、激波振动和多次折叠腔损耗等困难,测得脉冲氧碘激光器的增益系数为 $2\times 10^{-3}cm^{-1}$ 。这在国际上还是第一次获得的数据。

总之,经过多年的努力,我国的氧碘化学激光器的研究工作已脱颖而出。

- [1] W.E. McDermott et al., *Appl. Phys. Lett.*, **32** (1978), 469.
- [2] R.G. Dervent and B. A. Thrush, *Chem. Phys. Lett.*, **9** (1971), 591;
R.G. Dervent and B.A. Thrush, *Farad. Soc.*, **53** (1972), 162.

高温氧化物超导材料奇特的输运性质

阎守胜

(北京大学物理系,北京 100871)

高温氧化物超导材料有很多不同寻常的物理性质,其最奇特的部分是正常态的输运性质。

Abstract

High temperature oxide superconductors possess many abnormal physical properties, the most remarkable one is the transport property, found in the normal state above the transition temperature.

在临界温度 T_c 以上,高温超导材料处于正常态。正常态的输运性质与载流子的种类、浓

度、能带结构和散射机制联系在一起。这一点对了解高温超导材料的微观机制至关重要。在